

官能検査を自動化するための判定技術

Judgment Technology to Automate Sensory Inspection

小	菅	太	Futoshi KOSUGA
田	畑	文夫	Fumio TABATA
大	瀧	淳司	Atsushi OTAKI
植	原	孝之	Takayuki UEHARA
山	本	和幸	Kazuyuki YAMAMOTO



要 旨

官能検査とは、人間の感覚を用いて正常・異常を検査する検査である。そのため、判定基準が曖昧であるという弱点はある反面、多種多様な異常を検知することが可能であるという強みもある。

当社はDVDデッキの製造ラインの検査工程において、官能検査の一種である異音検査の自動化に取り組んできた。しかし、“異音”を定量的に判定するために、予め異常のパターンを設定し、“異常ではない”ことを判定していた。そのため、初期段階で数多くの異常品のパターンが必要であり、かつ、既知の異常のパターンしか検出困難であるといった課題があった。

そこで今回は、品質工学の一手法であるMT法を異音検査装置の判定部分に適用し、正常品のパターンを定義することで、“正常であるか”を判定する技術を開発し、実用化が図れたので報告する。

Abstract

"Sensory inspection" detects normality / abnormality by using human senses. Its weakness is that the criterion is hard to define, but its strength is that it is able to detect a range of abnormalities.

Our company has been researching a way to automate the process of identifying 'abnormal noises' (a kind of sensory inspection) as this is an issue in our inspection process of DVD deck production line. To quantitatively judge "abnormal noises," our past approach has been to pre-judge many 'abnormal patterns' at the initial step, and apply those as inspection tools. The limitation of this approach is that the test only looks for those 'pre-set' patterns.

Now we have developed and implemented new technology to judge "normality" by use of quality engineering MT method on the judgment part of abnormal noise inspection device and by defining patterns of normal products.

1

はじめに

当社の車載用DVDデッキの製造ラインでは異音検査を実施している。異音検査工程では、ディスクの挿入、排出動作などの作動音に異常がないことを確認している。しかし、異音検査工程で作業者の聴感で良否判定を実施すると、判定基準が各々の感性に依存することとなり、判定基準が一定ではなくなる。そこで、異音を一定の基準で判定するために、異音検査工程の自動化に取り組んできた。

異音検査工程の自動化を実現するために、製造ラインの騒音環境下での集音技術および自動判定技術の開発を実施し、検査装置をDVDデッキの製造ラインに展開した。この検査装置で採用した判定技術には、あらかじめ定義された異常パターンに合致するか否かを検出する判定アルゴリズムを用いていた。しかし、実際の製品にはさまざまな異常パターンが存在し、良否判定をするために必要な異常パターンの定義と複雑な判定基準を設定する必要があった。そのため、他機種への展開が困難で、かつ複雑な判定基準が存在することによる、正常品を異常と判定する過検出も発生していた。

そこで、正常パターンに合致するか否かを判定することが可能であるMT法を用いて、新たな判定技術の開発を実施した。

2 従来のシステムにおける課題と開発目標

2.1 従来のシステムにおける課題

前述した従来の異音検査装置の概要を図1, 2に示す。まず、外部騒音を遮音した防音BOXの内部で対象物を動作させ作動音を録音する。次に、録音データから判定部分の抽出⇒フィルタ処理/音波形の数値化⇒異常パターンと照合⇒良否判定の順で処理を実行する。良否判定は、あらかじめ設定した十数種類の異常パターンに一致しない場合は正常とし、一致した場合は異常と判定する。

しかし、前述したように従来システムには次のような課題があった。

- (1) 製造ラインへの展開前に、数多くの異常パターンが必要であり、異常パターンを量産開始前にすべて定義することは困難であった。
- (2) 過検出率が約2%存在した。

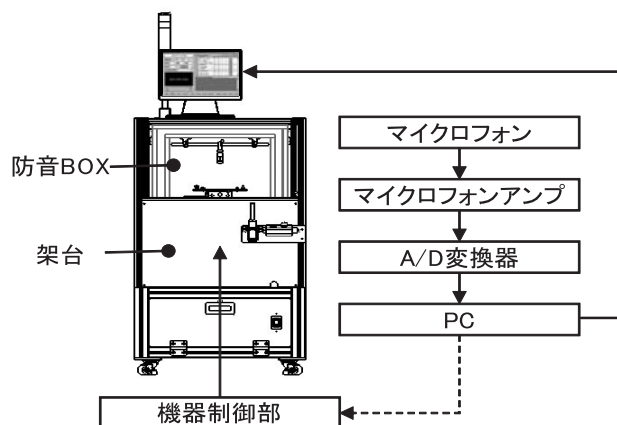


図1 従来システムの概要（ハードウェア）

Fig.1 Outline of Conventional System (Hardware)

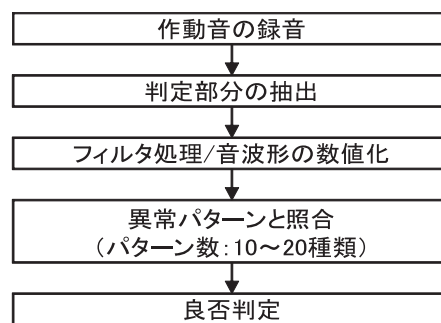


図2 従来システムの概要（検査フロー）

Fig.2 Outline of Conventional System (Inspection flow)

2.2 開発目標について

従来システムでの課題を解決するために、新たな異音検査における判定技術の開発に取り組んだ。その際の実開発目標として、

(1) ハードウェア：従来システムと同等

(2) 判定アルゴリズム：

- ① 量産前でも、正常品のみで判定基準が作成可能であること
- ② 異常品の流出がない状態で、過検出率1% 以下
(従来システムで発生していた過検出の半分以下)と設定した。

開発目標において、“正常品のみで判定基準を作成する”すなわち、正常品かどうかを判断するという手法は、従来の異常パターンとのパターンマッチングとは異なるアルゴリズムを必要とする。そこで、上記開発目標を達成する手段として、MT法を用いた判定技術を開発することとした。

3 MT法を用いた異音検査技術

3.1 概要

MT法は、品質工学の体系のなかにマハラノビス距離の概念を導入したパターン認識の手法であり、1980～1990年に品質工学の創始者である田口玄一博士より提案された。MTとは、Mahalanobis Taguchi（マハラノビスタグチ）の頭文字である。その後、さまざまな考え方がMT法に付加され、これらをまとめてMTシステムと呼ばれている。MTシステムは、以下の分野で実用化あるいは検討されている。

- ・分類（手書き文字認識、音声認識、画像認識）
- ・予測（利益予測、地震予知、強度予測）
- ・診断（病気の診断、火災報知、工業用検査、故障診断）

MT法を理解するためには、有名な小説「アンナカレーニナ」にある次の一節が参考になる。

「幸福な家庭はどれも似た様なものだが、不幸な家庭は、いずれもそれぞれ不幸なものである」

これを異音検査に置き換えると、「正常な音波形は、ばらつきも小さく特徴も似通っているが、異常な音波形は、ばらばらで様ではない」ということになる。

MT法は、この性質を利用して、均一であるが故に定義しやすい正常品データの集まり（これを単位空間と言い、以下、単位空間と記す。）だけを定義し、そこから離れている場合をすべて異常と判断する方法である。単位空間に近い、あるいは、遠いを表す尺度として、図3に示すように、「マハラノビス距離」という概念を用いる。すなわち、MT法では、マハラノビス距離を計算し、それが小さい場合は単位空間に近いので正常、マハラノビス距離が大きい場合は単位空間から離れているので異常と判断する。マハラノビスとは、この考え方を提唱したインドの統計学者の名前である。

マハラノビス距離は、以下の式で定義される。

$$\text{マハラノビス距離} = \sqrt{k X^t R^{-1} X} \quad (k: \text{定数}) \quad \cdots (1)$$

X：正常と異常を区別できる物理量（以下、特徴量と記す）を集めた多次元ベクトル（ X^t ：転置行列）

R：単位空間から計算された相関行列（ R^{-1} ：逆行列）

MT法では、後で述べるデータの規準化により、正常品のマハラノビス距離は1に近くなり、逆に、異常品のマハラノビス距離は数十以上の大きな値になる。この性質を利用することで、従来、人の聴感に依存していた定性的な判定基準を数値化することができる。

MT法の特長は、

- (1) 一つの数値（マハラノビス距離）だけで、正常か異常かを定量的に判定できる。
- (2) 異常特有のパターンを抽出する方法ではないので、将来、発生するかも知れない未知の異常パターンも検出することができる。

これを用いて異音検査で良否判定を行うためには、

- ・単位空間の作成および(1)式の作成
- ・(1)式で算出されたマハラノビス距離に対するしきい値の設定

が必要である。

マハラノビス距離を計算する具体的な手順を以下に示す。

- ①正常品の音波形（単位空間データ）を収集し、そこから正常か異常かを区別できそうな特徴量を複数（通常200個程度）取り上げる。（表1）
（例 レベル、波形の面積など）
- ②各特徴量の平均値 m と標準偏差 σ を計算する。
- ③各特徴量のデータ群を $m=0$ 、 $\sigma=1$ となるように規準化する。
- ④規準化されたデータの相関行列 R を求める。
- ⑤相関行列 R の逆行列を計算し、(1)式に代入する。
- ⑥判定対象の音データを取得し、特徴量を抽出して、(1)式からマハラノビス距離を計算する。

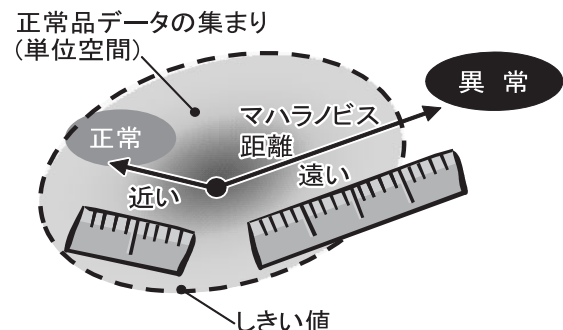


図3 マハラノビス距離の概念

Fig.3 Concept of Mahalanobis Distance

3.2 異音検査へのMT法の適用手順について

実際に異音検査を行う場合、まず、3.1節で説明した①～⑤をオフラインで実施して、(1)式の R^{-1} を求めておく。さらに、マハラノビス距離（以下MD値と記す）に対するしきい値を設定する。しきい値は、検証可能な異常パターンが存在していない場合は、5以下程度に設定する。これは、単位空間のMD値の平均が1となる性質を持っているからである。また、異常パターンが存在している場合は、正常パターンと異常パターンのMD値の間に設定する。

製造ラインでは⑥を実施し、MD値を算出し、しきい値と比較する。しきい値より大きければ異常品、小さければ正常品と判定する。

良否判定の精度は、MD値を求める(1)式の精度に依存する。(1)式は単位空間を基に作成するため、単位空間の精度に依存することになる。さらに、単位空間は表1に示す正常品の特徴量と、正常品の集団から作成されるので、判定精度は特徴量と正常品の集団に依存することになる。なお、異音検査における特徴量とは、音波形の特徴を数値化したものである。

表1 正常サンプルのデータ (例)
Table 1 Data of Normal Samples (Examples)

分類	特徴量1	特徴量2	...	特徴量N
サンプルA	0.15	0.32		0.55
サンプルB	0.11	0.41		0.43
サンプルC	0.13	0.35		0.44
⋮	⋮	⋮		⋮
サンプルN	0.11	0.42		0.45

3.3 音波形の数値化アルゴリズムについて

前述したように、異音検査の判定精度は音波形の特徴量に依存するため、音波形を的確に数値化する必要がある。音波形を数値化する場合、時間軸波形では、例えば“かん高い音”といったような周波数成分が関わる異常が検知できず、周波数波形では時間的に変化する間欠音などの異常が検知できないこととなる。

このことから、音波形の時間領域の情報と、周波数領域の情報を数値化する必要がある。そこで、図4に示すアルゴリズムにより、音波形を3つの帯域(低域、中域、高域)に分割し、各帯域の時間軸波形を数値化することで、時間領域と周波数領域情報をマトリックス状に網羅して特徴量とした。

3.4 単位空間の作成について

3.3節で述べた数値化アルゴリズムを用いて、単位空間の作成を実施した。DVDデッキの作動音は、正常音でもばらつきがある。従って、膨大な正常音のなかから、どのデータを単位空間に組み入れるかで、判定精度が左右される。今回は、過去に異音判定の基準を策定したDVDデッキ開発の担当者が、正常と判断した音波形を300程度選定し、図4に示すアルゴリズムを用いて単位空間の作成を実施した。

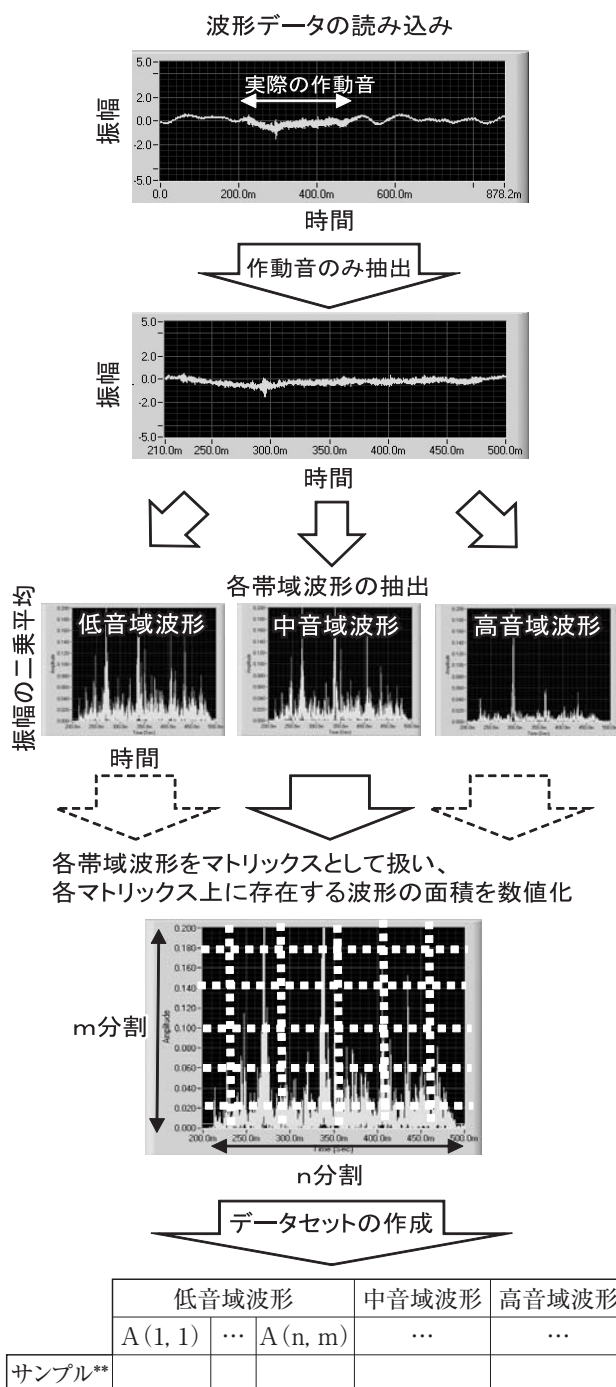


図4 音波形の数値化アルゴリズム
Fig.4 Algorithms to Digitize Sound Waveform

3.5 MD値を用いた正常品と異常品の判定について

3.3節で述べた数値化アルゴリズム、3.4節で作成した単位空間を用いて、過去の正常品と異常品に対して判別が可能であるかを検証した。ここでは、異常品の集団のMD値の最小値をしきい値と設定し、正常品の集団に対する

過検出の検証を実施した結果、図5に示すとおり、異常品を含むサンプルN=1000台で、過検出率は1.5%であった。

開発目標の過検出率1%以下に対して未達ではあったが、

現行システムよりも過検出が低減できる可能性があったため、実際の製造ラインでの試行を実施することとした。

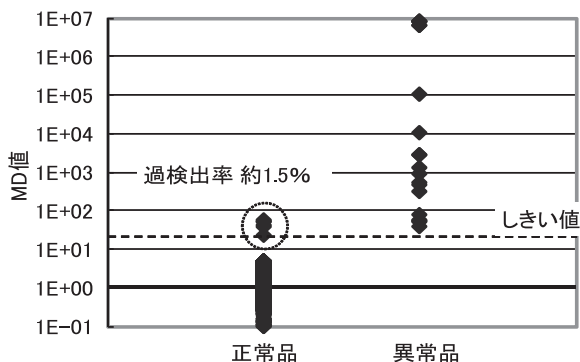


図5 MD値を用いた正常品と異常品の判定精度

Fig.5 Accuracy in Judging Normal/Abnormal Products by Use of MD (Mahalanobis Distance)

3.6 オフラインおよび製造ライン用ソフトウェア開発

実際に、製造ラインへ適用するためには、オフラインにて

- ・単位空間の作成
- ・MD値に対するしきい値の設定

製造ラインにて

- ・音波形の数値化
- ・MD値の算出
- ・MD値による判定

が可能なソフトウェアが必要である。

しかし、製造ラインで使用する専用ソフトウェアを開発すると、判定以外（たとえばI/O制御など）のソフトウェアを開発することとなるため、多大な開発工数が必要となる。そこで、オフライン用は、専用ソフトウェアを開発し、専用製造ライン用は、当社標準検査システムの検査シーケンスの一部として組み込み可能な判定ソフトウェアを開発した。（図6, 7）

【オフラインで使用する専用ソフトウェア】

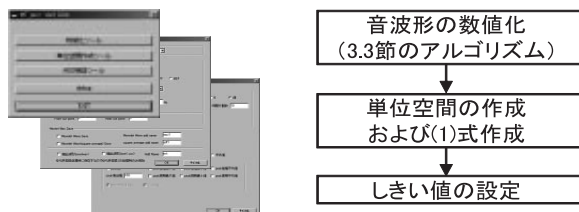


図6 オフライン用専用ソフトウェア

Fig.6 Software Exclusive for Offline Use

【製造ラインで使用する専用ソフトウェア】

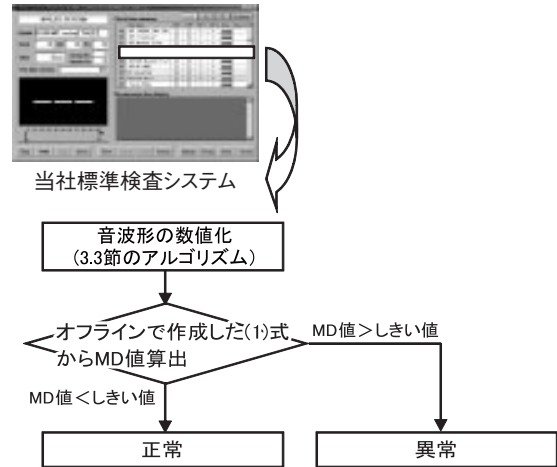


図7 製造ライン用専用ソフトウェア

Fig.7 Software Exclusive for Production Line

3.7 製造ラインへの適用結果

3.6節で作成したソフトウェアを、実際に製造ラインに適用した結果、3.5節で検証した過検出率よりも遥かに上回る約5%の過検出が発生した。（図8）

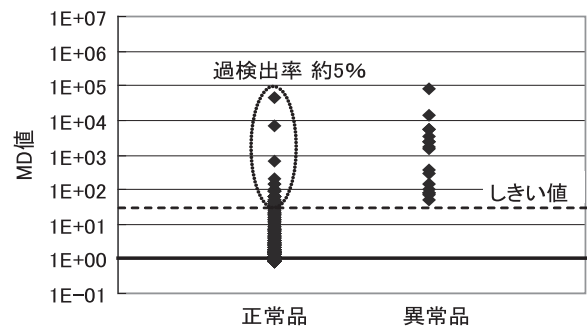


図8 製造ラインへ適用した際の過検出率

Fig.8 Excess Detection Rate When Applying Software on Production Line

MT法は性質上、正常品以外は全て異常品と判定する。そのため、単位空間として設定したサンプルと違う特徴を持つ正常品はMD値が大となり異常として判定される。作動音は、各構成部品のロットのばらつきや組み付け状態により、微妙に変化する。発生した過検出は、これらの変化を吸収できなかったためである。この問題を解決するためには、過検出を抑えるための調整が必要である。MT法を用いた判定の場合の調整方法として、次の①～③が考えられる。

①MD値に対するしきい値の見直し

単純にMD値のしきい値をシフトする。しかし、図9からもわかるように、MD値のしきい値をシフトすると、異常品が流出する可能性があるため現実的ではない。

②特徴量の見直し

過検出として異常と判定された正常品の特徴を解析し、

特徴量を再設定する。しかし、特徴量が変化する、すなわち既存の単位空間が使用できなくなるため、単位空間を一から再作成し検証する必要がある。これには、多大な工数を要する。特徴量の検討が、十分に実施されていない場合は有効な手段であるが、十分に検討された特徴量を設定している場合は、調整困難で現実的でない。

③単位空間の見直し

過検出として異常と判定した正常品のパターンを、正常パターンとして既存の単位空間に新たに追加する。以降、同様のパターンの正常品のMD値は小となるため、正常品として判定可能である。

今回の検討においては特徴量の検討は十分に実施しており、異常品サンプルのデータも十分に存在した。そのため、上記③の手法が現実的であると考えた。そこで、過検出となった正常品のデータを、正常パターンとして既存の単位空間へ追加する手法を試みた。しかし、図9に示すように過検出となったサンプルを無条件に単位空間に追加してしまうと、異常品のMD値も低下し、良否判定が成立しなくなってしまった。この問題を解決するために、図10, 11に示すアルゴリズムに基づき、単位空間の見直しを実施した結果、図12に示すように改善が可能となった。

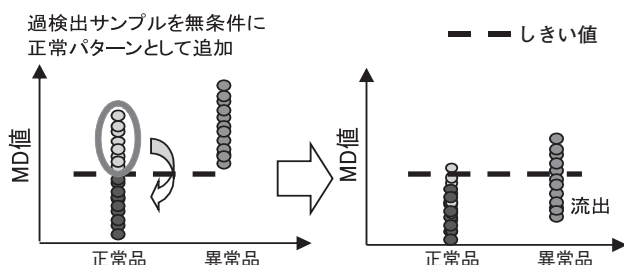


図9 無条件に過検出サンプルを追加した場合

Fig.9 Result When Adding Unchecked Excess Detection Samples

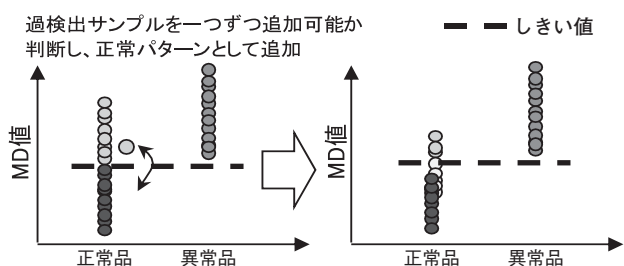


図10 過検出サンプルを確認しながら追加

Fig.10 Result When Adding Checked Excess Detection Samples

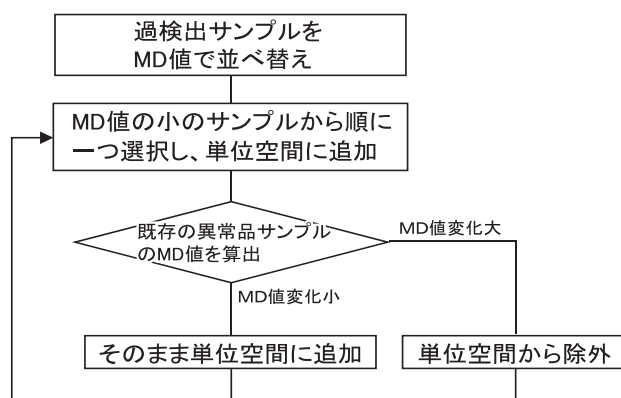


図11 過検出サンプルを単位空間に追加するアルゴリズム

Fig.11 Algorithms to Add Excess Detection Samples into Unit Space

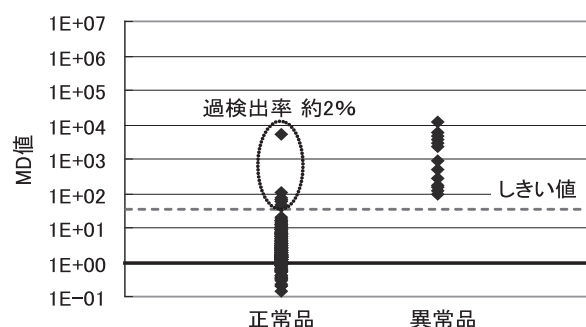


図12 単位空間見直し後の過検出

Fig.12 Excess Detection after Reviewing Unit Space

3.8 さらなる過検出の低減について

図12において、過検出率は約2%まで低減できる手法を検討できたが、目標値である1%以下には達しなかった。過検出の低減を阻害する主要要因が、図13～15に示す音波形の存在である。図13, 14の音波形は、特定の帯域で発生する突発的な音（例えば、フレキの屈曲が変化するときの微小な音など）であり、図15はレベルの小さな間欠音である。図13, 14に示す音波形は、通常の動作時に発生する可能性がある作動音であり、聴感でも問題ないため、正常と判定する必要がある。しかし、図15に示す音波形は、異音であるため、異常と判定する必要がある。

図13のような音波形は突出部分の時間が不確定であるため、単位空間に追加しても図14のような音波形が発生すると、新たに過検出が発生する。また、図15のような波形は、図16のような良品限度付近の作動音のレベルとの判別が困難である。

しかし、従来の異常パターンを検出する判定技術では、特定のパターンが検出可能である。そこで、図13～15のような音波形はMT法では判定せずに、従来技術を用い、特定のパターンを設定し、図13, 14は正常品として、図15は異常品として検出することとした。(図17・表2)

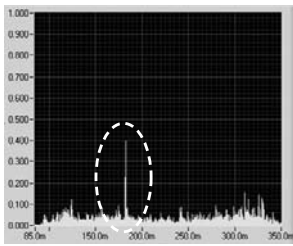


図13 問題がない突発音がある音波形1
Fig.13 Sound Waveform 1 Having Clicking Noise of No-problem

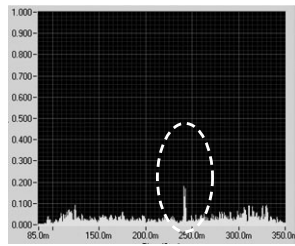


図14 問題がない突発音がある音波形2
Fig.14 Sound Waveform 2 Having Clicking Noise of No-problem

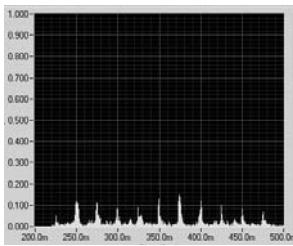


図15 レベルの低い間欠音
Fig.15 Rattle Noise of Low Level

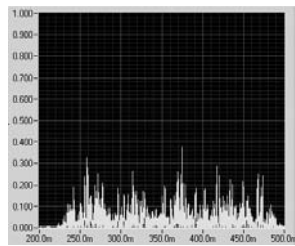


図16 良品限度の作動音
Fig.16 Operation Noise of Normal Product Close to Boundary

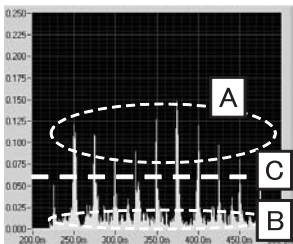


図17 従来の判定技術の適用
Fig.17 Application of Conventional Judgment Technology

従来の判定技術では、
・ AとBのレベル比
・ レベルCの超過回数
・ 全体のレベル
で波形パターンを検出。

表2 従来の判定技術による図13～16の判定

Table 2 Judgment of Fig.13 to Fig.16 by Conventional Technology

分類	レベル比	超過回数	全体レベル	判定
図13の音波形	大	小	小	OK
図14の音波形	大	小	小	OK
図15の音波形	大	大	小	NG
図16の音波形	小	小	大	OK

4 官能検査を自動化するための判定技術

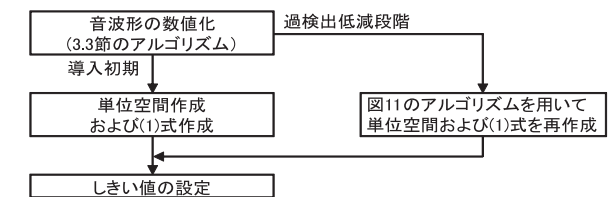
4.1 官能検査を自動化するための判定技術

3章で述べた開発および検証結果より、開発目標を達成するためには、図6, 7に示すアルゴリズムだけでは過検出の低減には限界があるため、図11に示すアルゴリズムおよび、従来の判定技術を組み合わせることが有効な手段となる。官能検査を自動化する判定技術として、導入初期で

は異常パターンが存在しないため、図6, 7に示すアルゴリズムを用い、過検出となる特異な正常パターンおよび異常パターンが発生した時点で、単位空間の最適化を実施、従来の判定技術を用いた判定に切り替えることが効果的であることが分かった。

実施に実用可能な判定アルゴリズムとして、図6, 7を改良した結果を図18に示す。

【オフラインで使用する専用ソフトウェア】



【製造ラインで使用するソフトウェア】

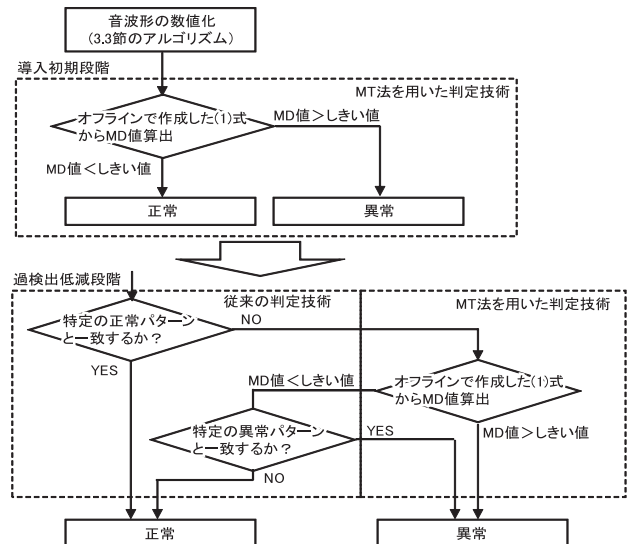


図18 官能検査を自動化するための判定技術

Fig.18 Judgment Technology to Automate Sensory Inspection

4.2 適用結果と今後の課題

(1) 適用結果

図18に示す判定技術の適用結果を表3に示す。

表3 適用結果

Table 3 Application Result

開発目標	従来の判定技術	MT法を用いた判定技術	従来 + MT法
正常品のみでの判定基準の作成	×	◎	○ ⁽¹⁾
異常品の流出0	○	○	○
過検出1%以下	約2%	約2%	1%以下 ⁽¹⁾

* (1) 導入初期には正常品のみで判定基準を作成可能であるが、過検出1%以下を満足するためには図18に示す手順で量産途中で判定フローを変更する必要がある。

(2) 今後の課題

今回、初めて品質工学の手法であるMT法を異音検査に用いることにより、官能検査におけるMT法の有効性を確認することができた。この手法は、検査対象の特徴を的確に数値化できれば、他の官能検査への適用も可能である。

一方、MT法はその数学的な制約から、特徴量の数より多い単位空間のデータが必要とされる。すなわち、導入前に多数の正常品のサンプルが必要となる。今後は少ない正常品のサンプルでも判定基準が作成可能な手法についても検討していきたい。

5

おわりに

以上、官能検査を自動化するための判定技術の開発として、異音検査工程における適用事例を紹介した。

最後に、今回の開発にあたりご協力、ご指導いただいた関係者の方々に心より感謝いたします。

参考文献

鴨下隆志他，おはなしMTシステム（予測・推測の可能性を広げる品質工学手法），日本規格協会，2005

筆者紹介



小菅 太
(こすが ふとし)

1994年入社。以来、樹脂成形等の加工技術の開発・検査設備の開発に従事。現在、生産企画本部 生産技術統括部 生産技術開発部に在籍。



田畑 文夫
(たばた ふみお)

1978年入社。以来、製造装置、ロボット、光ディスク装置の開発に従事。現在、品質保証本部 品質工学推進室に在籍。



大瀧 淳司
(おおたき あつし)

1993年入社。以来、カセットデッキ、MDデッキ、DVDデッキの開発に従事。現在、CI第一技術本部 デッキ技術部に在籍。



植原 孝之
(うえはら たかゆき)

1992年入社。以来、自動制御機器・検査設備の開発に従事。現在、生産企画本部 生産技術統括部 生産技術開発部に在籍。



山本 和幸
(やまもと かずゆき)

1989年入社。以来、自動化設備の制御技術開発・製品検査技術開発に従事。現在、生企 生産技術統括部 生技管理部TL。